Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 4, 2022, p. 481-495

Evaluation of a Chickpea Harvesting Header with Perforated Plate

A. Niazi[1], H. Golpira[2], H. Samimi Akhijahani[3*]

1- Graduate student of Mechanics of Agricultural Machinery, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
2- Assistant Professor of Department of Biosystem Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
3- Assistant Professor of Department of Biosystem Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: h.samimi@uok.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2021.69403.1028

Received: 15-03-2021 Revised: 07-08-2021 Accepted: 01-09-2021 Available Online: 04-09-2021	**How to cite this article:** Niazi, A., Golpira, H., & Samimi Akhijahani, H. (2022). Evaluation of a Chickpea Harvesting Header with Perforated Plate. *Journal of Agricultural Machinery*, *12*(4), 481-495. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2021.69403.1028

Introduction

One of the biggest problems in growing legumes like peas is harvesting these types of crops. During the machine harvesting process the harvest loss is very high. Therefore, in most parts of Iran chickpea harvested by hand and this is very tedious. Based on the literature review there are different types of harvesting machines which designed, constructed and optimized by Miller *et al.*, 1990; Golpira, 2015; Shahbazi, 2011; Jalali and Abdi, 2014; Mahamodi, 2016. But using different varieties of chickpea in mountainous areas has limited the use of harvesting mechanisms. The purpose of this study is mechanization of the harvesting process of chickpea with low losses and suitable performance. Moreover the optimization process of lowering the weight of the header was carried out by modeling of software.

Materials and Methods

To reduce the amount of chickpea losses from the reel, a perforated plate with defined holes was installed in the header, where the separated chickpea pods fell behind the plate without returning to the farm. By using the plate in the header of the chickpea harvesting machine and by changing the harvesting height at the three levels of 10, 15 and 20 cm and the distance of the cutter at three levels of 3, 5 and 7 mm, the performance of the machine was evaluated. The experiments were carried out with *Caboli* variety cultivated in Kurdistan province, which is proper for mountainous areas without regular watering condition in three replications. The plants were placed in a fiber, wooden plate considering farm conditions. In addition, the header was modeled statically and dynamically under the influence of the external forces applied to the header using Ansys and Abaqus software. Based on the actual data, the validity of the applied model was determined and according to the verification results the optimization of the header was performed considering minimal weight (to reduce energy consumption).

Results and Discussion

The evaluation results of the performance of header showed that the effects of using perforated plate and the height of the header for harvesting on the chickpea harvesting and losses are significant at the level of 1% and 5%, respectively, and the interaction between perforated plate and the header height on the chickpea loss is significant at 5%. Using a perforated plate in the harvesting machine increases the amounts of chickpea collected from the farm increases. In this condition the chickpea pods separated from the plant and passed through the plate. With the separation of the stems, due to the proper wear that exists between the plate and the reel, the pods are properly separated and pass through the perforated plate. Moreover, the chickpea loss is higher for the system without perforated plate. The effect of the distance between the reel and header plate is affects the remaining chickpea on the plate. By increasing the distance from 5 mm to 7 mm the amount of harvested had a considerable effect. The best method of harvesting chickpeas is at the kinematic index of 1.5 with perforated plate, the harvesting height of 15 cm and the distance of 5 mm. According to modeling processes of the reel and the results of the static analysis, the minimum and maximum stress values were recorded about 3.31 MPa and 6.50 MPa (based on the von misses criteria), respectively, which is very small compared to the yield stress of the reel constructed with St-37. Also, the results of the dynamic analysis of the reel showed that the maximum von misses stress occurred with increasing the kinematic index. The maximum stress for kinematic index of 1, 1.5 and 2 was observed about 32.2, 40.1 and 52.72 MPa, respectively. The results of 3D model validation showed that the applied model with Abaqus software (R^2>0.9264) was able to predict the amount of stress in different parts of the reel.

Conclusion

In this study, the changes were made on the chickpea harvesting machine to get the proper performance and increasing machine efficiency. A perforated plate was used to prevent pea's losses. The best condition for the harvesting process is obtained with the harvesting height of 15 cm and the distance of 5 mm. By using 3D modeling of the reel weight was reduced about 10%.

Keywords: Loss, Modeling, Optimization, Perforated plate, Stress

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ص ۴۹۵-۴۸۱

ارزیابی یک نوع چرخ‌فلک ماشین برداشت نخود با صفحه مشبک در دماغه

علی نیازی[۱]، هیوا گل‌پیرا[۲]، هادی صمیمی اخیجهانی[۳*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰

چکیده

یکی از بزرگ‌ترین مشکلاتی که در کشت بقولاتی مانند نخود وجود دارد، برداشت این محصولات با ریزش بسیار زیاد است. هدف از اجرای این پژوهش، برداشت مکانیزه نخود با تلفات کم و عملکرد مزرعه‌ای مناسب است. طراحی این ماشین به گونه‌ای است که همانند کمباین‌های متداول برداشت غلات قابلیت تنظیم موقعیت چرخ فلک نسبت به دماغه و تغییر ارتفاع را دارد. همچنین برای کاهش ریزش دانه ناشی از بازگشت محصول برداشت شده صفحه مشبکی به زیر چرخ‌فلک اضافه شد. در این تحقیق چرخ‌فلک برداشت نخود با هدف کاهش تلفات دانه مورد ارزیابی قرار گرفته و مدل‌سازی، تحلیل دینامیکی و استاتیکی چرخ‌فلک ماشین‌برداشت نخود انجام گرفته است. سامانه باز طراحی شده با تغییر عوامل تاثیرگذار شامل دماغه با صفحه مشبک و بدون صفحه مشبک، ارتفاع شانه برش نسبت به زمین در سه سطح ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر و فاصله چرخ‌فلک از شانه در سه سطح ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر در سه تکرار مورد ارزیابی قرار گرفت. تحلیل آزمایش‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. نتایج آماری نشان داد، استفاده از صفحه مشبک تاثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر مقدار برداشت و ریزش داشته است اما در مورد نخود باقی‌مانده بر روی بوته این اثر در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد. تاثیر ارتفاع دماغه از سطح زمین بر میزان برداشت در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. همچنین اثر متقابل ارتفاع برداشت و صفحه مشبک نیز بر میزان ریزش در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد. بیشترین تاثیرگذاری بر نخود باقی‌مانده بر روی بوته در اثر فاصله بین چرخ‌فلک و دماغه به‌وجود آمد. علاوه بر آن برای بهینه‌سازی ابعادی اجزای چرخ و فلک از روش اجزای محدود سه بعدی با تحلیل تغییر شکل و شکست با معیار ون میسز (von-Mises) استفاده شد. به کمک مدل‌سازی رایانه‌ای و با توجه به تجزیه و تحلیل دینامیکی مدل جدیدی از چرخ‌فلک برای ماشین برداشت با هدف کاهش وزن، ارائه شد. در طرح ارائه شده با توجه به نیروی متقابل بین محصول و چرخ‌فلک ماشین برداشت نخود، میزان قابل‌توجهی از وزن چرخ‌فلک کاسته شد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، تنش، ریزش، صفحه مشبک، مدل‌سازی

مقدمه

نخود با نام علمی سیسر آریتینیوم (*Cicer Arietinum* L.) گیاهی است دولپه‌ای از خانواده بقولات که ارتفاع بوته‌ی آن در حدود ۳۰ سانتی‌متر است (Razavi, Zaerzadeh, Khafaji, & Pahlevani, 2010). این محصول به‌واسطه ارزش غذایی و پروتئین موجود در آن، تثبیت نیتروژن در زمین و درآمد آن برای کشاورزان بسیار مورد توجه است (Guler, Sait-Adak, & Ulkan, 2001; Samineni, Siddique, Gaur, & Colmer, 2011). نخود منبع اصلی پروتئین در کشورهای در حال توسعه است و نقش ویژه‌ای در تولید غذا را در این کشورها دارد (Anjum, 2016). با وجود این‌که ایران جزء بزرگ‌ترین کشورهای تولیدکننده نخود می‌باشد، اما همچنان برداشت آن با مشکل مواجه بوده و به‌صورت سنتی و با دست انجام می‌شود. علاوه بر آن برای مدیریت صحیح در برداشت نخود، کشاورز بایستی در تعیین زمان برداشت دقت کافی اعمال نماید (Konak, Carman, & Aydin, 2002). تلفات برداشت ماشین‌های برداشت در دو بخش دماغه و واحد کوبش اتفاق می‌افتد. واحد برش از دماغه تا حدود ۶۸ درصد از تلفات حین برداشت را به خود اختصاص می‌دهد (Ebrahimi-Nik, Khademolhosseini, Abbaspour-Fard, Mahdini, & Alami-Saied, 2009). علاوه بر آن تأثیر سرعت پیشروی کمباین و سرعت دوران چرخ‌فلک نیز بایستی در تلفات دانه در زمان برداشت باید به‌دقت مورد بررسی قرار گیرد

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۳- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: h.samimi@uok.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2021.69403.1028

(Griffin, 1973). از طرف دیگر مشکلاتی از قبیل عدم یکنواختی در رسیدگی، ناهموار بودن زمین، کوتاه بودن بوته و خشک بودن بیش از حد آن هنگام برداشت، کشت گسترده محصول را محدود می‌سازد (Zobeiri, Rostampour, Rezvanivand Fanaei, & Nikbakht, 2020; Modares Motlagh, Rostampour, & Mardani, 2018; Singh, Gaur, Singh, & Chaturvedi, 2018). محققان تاکنون اقدامات زیادی برای ساخت ماشین‌برداشت نخود انجام داده اند، اما هنوز ماشینی که بتواند این محصول را با تلفات قابل‌قبول به‌خصوص در مناطق کوهستانی برداشت نماید ارائه نداده‌اند و در مناطق زیادی از کشور برداشت این محصول هنوز با دست انجام می‌گیرد. برداشت نخود به‌صورت دستی با کندن بوته از خاک همراه با ریشه انجام می‌شود که این نوع برداشت معایبی دارد (Golpira, Tavakoli, Khoshtaghaza, M. H., & Minaei, 2009; Behroozi-lar & Huang, 2002; Modares Motlagh *et al.*, 2018: Sidahmed & Jaber, 2004): ۱- با کندن بوته همراه با ریشه، نیتروژنی که می‌تواند توسط ریشه در خاک تثبیت شود، از دسترس خارج می‌شود. ۲- پس از جدا کردن دانه از کاه و کلش مواد باقی‌مانده به دلیل داشتن ازت زیاد در ریشه و همچنین خاک، برای تعلیف دام مناسب نیستند. ۳- هزینه برداشت به دلیل هزینه کارگری، بسیار بالا و طاقت‌فرساست؛ بنابراین چنین استنباط می‌شود که روش سنتی کندن بوته از زمین روش مناسبی برای برداشت نخود نباشد.

همان‌طور که اشاره شد، از آنجا که محصول نخود در مرحله رسیدگی و به هنگام برداشت مستعد ریزش می‌باشد، چالش عمده کشاورزان به حداقل رساندن تلفات حاصل از برداشت است. به‌طور غالب در ماشین‌های برداشت دانه برای هدایت محصول به سمت دستگاه برش از مکانیزم چرخ‌فلک استفاده می‌کنند. ساختار چرخ‌فلک متناسب با نوع و شرایط محصول و همچنین نوع دستگاه برداشت می‌تواند متفاوت باشد. اغلب چرخ‌فلک‌های به‌کار رفته در ماشین‌های برداشت از نوع پره‌ای و یا انگشتی‌دار است. در این نوع چرخ‌فلک‌ها سرعت دورانی و موقعیت قرارگیری چرخ فلک نسبت به سکوی برش، از عوامل قابل‌تغییر در چرخ‌فلک هستند. سرعت دورانی چرخ‌فلک با سرعت پیشروی ماشین برداشت رابطه مستقیم دارد. در بیشتر شرایط محصول، نسبت سرعت محیطی چرخ‌فلک به سرعت پیشروی کمباین بین ۱/۲۵ تا ۱/۵۰ متغیر است (Mansori-Rad, 2006; Dehghan-Hesar & Kalantari, 2019; Srivastava, Goering, Rohrbach, & Buckmaster, 2006; Golpira, 2015).

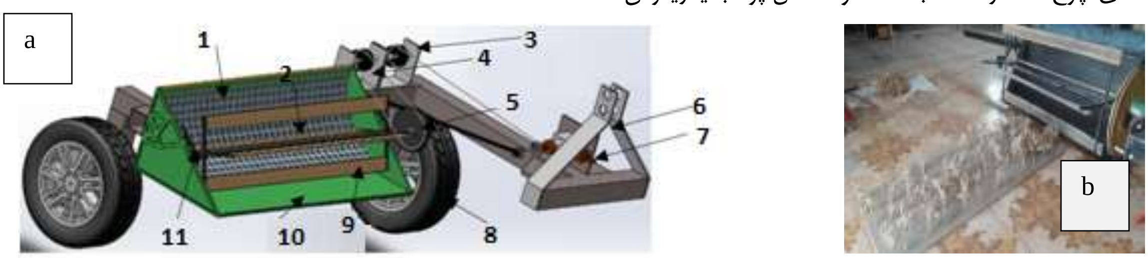
تحقیقات محدودی در زمینه طراحی و ساخت و حتی نحوه تغییر مکانیزم‌ها برای برداشت نخود انجام شده است. میلر و همکاران (Miller, Wright, Mailander, & Beard, 1990) یک نوع چرخ فلک با ساختار مثلثی با زوایای یکسان به جای نوع ثابت را روی ماشین برداشت ارائه کردند. نتایج نشان داد که استفاده از این مکانیزم عملکرد ماشین را افزایش می‌دهد. هیرای و همکاران (Hirai, Inoue, & Mori, 2004) به کمک سامانه‌ای نیروی وارده از سوی چرخ فلک کمباین برداشت غلات را که به ساقه محصول وارد می‌گردد، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آن‌ها با آنالیز خمشی و پاسخ دینامیکی ساقه محصول، نیروهای افقی و عمودی را در دو حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده، بررسی نمودند. در حالت خمش ماکزیمم نیروی عکس‌العمل افقی هر بوته گندم ۳/۱ نیوتن و مقدار حداکثر آن در راستای عمودی ۰/۸ نیوتن به‌دست آمد. شهبازی (Shahbazi, 2011) با توسعه یک نوع سامانه ارزیابی، تأثیر صدمات ضربه‌ای که از دندانه‌های چرخ‌فلک به ساقه نخود وارد می‌شود را بررسی نموده و نتایجی را در خصوص طراحی ماشین برداشت نخود ارائه کرد. گل پیرا و همکاران (Golpira, Tavakoli, & Baerdemaeker, 2013) بر اساس اصول غلاف چین‌ها نمونه‌ای نوین از ماشین برداشت نخود را ارائه نمود که در آن از مکانیزم دماغه مجهز به انگشتی‌های ثابت غلاف چین استفاده نموده بود. جلالی و عبدی (Jalali & Abdi, 2014) با بیان این‌که عملکرد مناسب مکانیزم برش از سرعت پیشروی، سرعت محیطی چرخ‌فلک، ارتفاع برش، رطوبت محصول و نوع محصول ناشی می‌شود، اثر شاخص سینماتیک و ارتفاع برش را بر افت دماغه کمباین موردمطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که بیش‌ترین افت مربوط به بیش‌ترین شاخص سینماتیکی است. زارعی و عبدالله پور (Zareei & Abdollahpour, 2016) در تحقیق مشابه شبیه‌سازی سیستم کنترل فازی عصبی افت برای بهینه کردن تنظیمات هد کمباین غلات را انجام دادند. شاخص سینماتیکی، ارتفاع برش محصول، فاصله افقی و عمودی چرخ‌فلک از شانه‌برش عواملی بودند که برای بررسی انتخاب شدند. با بهینه‌سازی، مقادیر ۱/۲، ۱/۵ و ۲/۵ برای شاخص سینماتیکی چرخ‌فلک، ارتفاع برش محصول و مسافت افقی و عمودی چرخ‌فلک از شانه برش به‌دست آمد و تلفات کمباین به میزان قابل‌توجهی (۱۰۳ کیلوگرم در هکتار) کاهش یافت. محمودی (Mahmoudi, 2016) چرخ‌فلک مخصوص دماغه غلاف چین نخود را طراحی نمود که با پیشروی ماشین در مزرعه، انگشتی‌های ثابت غلاف چین در ارتفاع مماس با سطح زمین به داخل محصول ایستاده نفوذ می‌کرد. هم‌زمان با پیشروی ماشین پره‌های چرخ‌فلک غلاف‌چین که تحت‌فشار فنرهای پیچشی بودند، بوته نخود را به سمت شانه غلاف‌چین هدایت کرده و با اعمال فشار به بوته از لغزش محصول در شانه ممانعت به‌عمل می‌آمد. گل پیرا و گل پیرا (Golpira & Golpira, 2017) مدل‌سازی فرا ابتکاری برای بهینه‌سازی ماشین برداشت نخود انجام دادند که استفاده از آن باعث کاهش زمان، هزینه، آزمایش‌های مزرعه و تحلیل‌های آماری می‌شد. ترکیب الگوریتم ژنتیک با مدل فازی و الگوریتم محاسباتی ترکیبی ایجاد نمود که از طریق آن، بهترین اندازه

سکوی برش جهت توسعه ماشین برداشت نخود پیش‌بینی شد. مردانی (Mardani, 2016) مشکلات برداشت نخود را در ایران، فصل رشد کوتاه و تنش‌های خشکی وارده بر گیاه (که موجب خوابیدگی و افزایش حساسیت به ریزش می‌گردد)، بیان نموده است؛ او با بررسی رفتار و خصوصیات نخود، استفاده از دماغه‌های لخت‌کننده را گزینه مناسبی جهت برداشت محصول نخود پیشنهاد داده است. زندیه (Zandiyeh, 2016) در بررسی تلفات ماشین برداشت غلات بیان نمود که بیشترین میزان افت مربوط به دماغه است؛ او با کاهش تلفات دماغه و کاهش ریزش دانه اقدام به طراحی و پیاده‌سازی سامانه کنترل سرعت دورانی چرخ‌فلک به‌صورت حلقه بسته نمود. با استفاده از حسگر مافوق صوت تراکم محصول را اندازه‌گیری نموده و به دنبال آن سرعت دورانی چرخ‌فلک تنظیم گردید.

یکی دیگر از عواملی که بر افزایش توان مورد نیاز در برداشت محصول و حتی میزان ریزش محصول تأثیر می‌گذارد، سنگین بودن وزن دستگاه است که این امر موجب محدود شدن میزان قدرت عمل سامانه، پرش محصول و ارتعاشات نامتعارف در هنگام برداشت می‌گردد (Tieppo, Romanelli, Milan, Sorensen, & Bochtis, 2019). در مناطق کوهستانی مانند کردستان به دلیل محدودیت‌های آبی که در چند سال اخیر به‌وجود آمده است، نخود به‌طور عمده به‌صورت دیم کشت می‌شود. بنابراین کشت رقم پاکوتاه در این منطقه به دلیل مقاومت به کم آبی بیشتر از گونه‌های دیگر در اولویت قرار دارد. این عامل باعث شده است که استفاده از مکانیزم‌های مشابه برای برداشت محدود گردد. همان‌طور که اشاره شد یکی از مشکلات مهم در برداشت نخود، ریزش محصول است. در این تحقیق با استفاده از افزودن یک صفحه مشبک به دماغه ماشین بردارنده نخود، سعی در کاهش میزان ریزش و افزایش بهره‌وری سامانه خواهد شد. در این حالت غلاف نخود با جدا شدن از ساقه و با حرکت چرخ‌فلک از سوراخ‌های صفحه عبور کرده و به سمت عقب دماغه منتقل می‌شود. علاوه بر آن ساقه محصول که غلاف‌ها به آن متصل هستند، با سایش پره‌های چرخ‌فلک از ساقه جدا شده و احتمال پرتاب یا ریزش محصول به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. با مطالعه تحقیقات پیشین این نوع مکانیزم برای محصولاتی نظیر گندم و جو به دلیل اتصال پایدار بخش بارده به ساقه امکان‌پذیر نیست. بنابراین در این تحقیق تأثیر متغیرهای ورودی آزمایش شامل صفحه مشبک، ارتفاع دماغه و فاصله افقی چرخ‌فلک نسبت به کف دماغه بر عملکرد سامانه (میزان افت و ریزش) انجام گرفته و یک ترکیب بهینه از پارامترها بر اساس بهترین کارکرد دستگاه ارائه شده است. علاوه بر آن، مدل‌سازی سامانه هم‌زمان با تغییر شاخص سینماتیکی با استفاده از نرم‌افزار Ansys برای حالت استاتیکی و Abaqus برای حالت دینامیکی انجام شده و بهینه‌ترین حالت با در نظر گرفتن میزان تنش و کرنش چرخ‌فلک و با هدف کاهش وزن دستگاه و تغییر در ابعاد چرخ‌فلک، معرفی شد. انتظار می‌رود استفاده از این سامانه تا حد زیادی بتواند به برداشت محصول با کمترین ریزش و بیشترین عملکرد کمک کند.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش ماشین بردارنده پشت تراکتوری طراحی شده توسط گلپیرا و همکاران (Golpira *et al*., 2009) که قابلیت تنظیم ارتفاع را داشته و تنظیم ارتفاع چرخ‌فلک به گونه‌ای متناسب با ارتفاع ساقه‌ی محصول تغییر می‌نمود، مورد استفاده قرار گرفت. همان‌طور که اشاره شد یکی از مهم‌ترین مشکلاتی که بر سر راه برداشت نخود به‌خصوص در مناطق کوهستانی مانند کردستان وجود دارد، ریزش محصول است. در ماشین بردارنده طراحی شده این امر به‌طور واضح بیان شده است (Zandiye, 2016). صفحه مشبک مورد نظر بر روی شانه برش و در امتداد انحنای چرخ و فلک قرار داده شد. در سامانه قبلی با برخورد چرخ و فلک به بوته غلاف نخود از بوته جدا شده و به قسمت انتهای مخزن دماغه حرکت می‌کرد. به دلیل سرعت زیاد چرخ‌فلک برای ضربه و سایش غلاف ها به بیرون از دماغه پرتاب می‌شدند. علاوه بر آن در برخی مواقع به دلیل رطوبت کم بوته‌ها در مزرعه، غلاف‌ها همراه با ساقه‌ها وارد دماغه شده و یا در اثر دوران چرخ‌فلک به‌صورت کامل از دماغه به سمت بیرون پرتاب می‌شوند.



شکل ۱ – الف) شماتیک ماشین بردارنده نخود ۱. صفحه توری دار، ۲. محور میانی، ۳. جعبه دنده تغییر سرعت، ۴. مکانیزم تسمه و پولی، ۵. پولی و محور، ۶. مالبند، ۷. شفت تواندهی، ۸. چرخ‌های حامل، ۹. چرخ‌فلک، ۱۰. دماغه، ۱۱. بازوی تنظیم، ب) نحوه برداشت محصول برای آزمایش‌ها

Fig. 1. a) Schematic of Chickpea harvesting machine, 1. Perforated plate, 2. Middle axis, 3. Speed change gearbox, 4. Belt and pulley mechanism, 5. Pulley and axle, 6. Belt, 7. Power shaft, 8. Carrier wheels, 9. Reel, 10. Header, 11. Adjustment arm b) The harvesting process for the experiments

بر این اساس برای کاهش ریزش و بهبود عملکرد سامانه از یک صفحه مشبک استفاده شد. در این حالت غلاف یا ساقه جدا شده از بوته فرصت زیادی برای ساییده شدن و قرار گرفتن در دماغه را داشته و با احتمال پایینی به بیرون انتقال می‌یابد. قسمت‌های مختلف ماشین بردارنده نخود در شکل ۱–الف نشان داده شده است. برای تنظیم فاصله عمودی چرخ‌فلک از کف دماغه در دو طرف چرخ‌فلک دو بخش تلسکوپی در نظر گرفته شده است که با حرکت چرخ‌فلک به سمت بالا و پایین این فاصله قابل تنظیم است. همچنین ارتفاع دماغه نیز با تنظیم‌کننده‌های متصل شده به چرخ‌های حامل امکان‌پذیر بود.

ارزیابی آزمایشگاهی

ماشین بردارنده نخود طراحی شده، تحت شرایط کاری تعریف‌شده در محیط کارگاه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه کردستان مورد ارزیابی قرار گرفت. از مزرعه تحقیقاتی کشاورزی دانشگاه کردستان واقع در روستای دوشان از توابع شهرستان سنندج ۵۰۰ بوته نخود به‌طور تصادفی از مزرعه‌ای انتخاب شدند. رقم نخود کشت‌شده کابلی با رطوبت ۱۴ درصد و عملکرد ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار بود. به منظور ایجاد شرایط مزرعه‌ای در کارگاه، بوته‌های انتخاب‌شده روی یک نئوپان قرار داده شدند. نحوه قرارگیری بوته‌ها بر روی صفحه مشابه الگوی رویش بوته‌ها در مزرعه بود (شکل ۱–ب). بوته‌ها با استفاده از مخلوط چسب زیپر (Zipper, ZC02M, Tabriz, Iran) بر روی صفحه ثابت می‌شدند طوری که می‌توانست همان نیروی کششی مربوط به خاک که به ریشه وارد می‌شد (۰/۵ ± ۵۳/۲ کیلوگرم نیرو) را تامین نموده و بوته به حالت ایستاده بدون تمایل به طرفین روی صفحه قرار گیرد. برای این کار از نیروسنج FD-564 با دقت یک درصد استفاده گردید. برای اندازه‌گیری نیروی وارد بر چرخ‌فلک و پره‌های آن از گشتاورسنج Luron, 8800-Q با دقت ۰/۱ کیلوگرم سانتی‌متر استفاده شد که قابلیت اتصال به رایانه را داشته و با توجه به نمودارهای ترسیمی، بیشترین مقدار مبنای ارزیابی با نرم‌افزار قرار داده شد. به‌منظور تأمین شاخص سینماتیکی در حین برداشت، نئوپان حاوی بوته‌های نخود به‌وسیله تراکتور در سرعت‌های مشخص به چرخ و فلک ماشین برداشت تغذیه شد و همزمان عملیات برداشت نخود انجام گرفت. مسیر حرکت پره‌های چرخ‌فلک نسبت به جهت پیشروی ماشین برداشت نخود و شعاع دوران چرخ‌فلک، منحنی سیکلوئیدی را تشکیل می‌دهند (Baruah & Panesar, 2005). برای توصیف رابطه بین سرعت پیشروی ماشین و سرعت دورانی از اصطلاحی به نام شاخص سینماتیکی (λ) استفاده می‌گردد که عبارت است از نسبت سرعت خطی چرخ‌فلک به سرعت پیشروی ماشین و با استفاده از رابطه (۱) به‌دست می‌آید (Hanna & Quick, 2007):

$$\lambda = \frac{r\,n\pi}{30\,V_f} \qquad (۱)$$

که در آن r شعاع چرخ‌فلک، n سرعت دوران چرخ‌فلک و V_f سرعت انتقالی چرخ‌فلک یا سرعت پیشروی تراکتور است. برای ارزیابی ماشین، شاخص سینماتیکی در سطح پیشنهاد شده ۱/۵ با سرعت ۲/۵ کیلومتر بر ساعت (Zandiye, 2016)، ارتفاع شانه برش نسبت به زمین در سه سطح ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر و فاصله چرخ‌فلک از شانه در سه سطح ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر در دو حالت با صفحه مشبک و بدون صفحه مشبک، در سه تکرار مورد ارزیابی قرار گرفت. سطوح انتخاب شده برای ارتفاع برداشت بر اساس میانگین بیشترین و کمترین ارتفاع قرارگیری غلاف نخود کابلی از زمین در نظر گرفته شد. همچنین خصوصیات هندسی غلاف نخود نیز مبنای تعیین سطوح فاصله عمودی از کف دماغه لحاظ گردید. آزمون برداشت در شرایط رسیدگی کامل محصول نخود با رطوبت حداکثر ۱۴ درصد انجام گرفت. ارزیابی‌ها شامل تعیین میزان ریزش، غلاف‌های باقی‌مانده روی بوته و برداشت محصول با استفاده از آزمایش فاکتوریل بر مبنای طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد.

محاسبات برداشت بر مبنای شمارش تعداد غلاف‌های نخود صورت گرفت. به عبارت دیگر تعداد غلاف‌هایی که داخل سینی سکوی برش قرار می‌گرفت به‌عنوان محصول برداشت‌شده در نظر گرفته شد. غلاف‌هایی که از بوته جدا شده اما داخل سینی قرار نگرفتند، به‌عنوان محصول تلف‌شده در محاسبات وارد شدند. در نهایت تعداد غلاف‌هایی که روی بوته نخود باقی مانده‌اند به‌عنوان محصول مانده لحاظ گردید. این تلفات در مزرعه یک تلفات واقعی و مؤثر است و با تلفات ناشی از ریزش دانه در زمان کنده شدن بوته از زمین، جمع بسته شده است. تلفات در این سامانه به دو بخش تقسیم می‌گردد؛ بخش اول مربوط به تلفات غلاف‌های جامانده بر روی ساقه و بخش دوم غلاف‌های نخود که برداشت شده اما به دماغه منتقل نشده و به هر دلیلی ریزش کرده‌اند. به این ترتیب میزان درصد تلفات کل، تلفات غلاف‌های باقی‌مانده روی بوته و تلفات غلاف‌های افتاده بر روی زمین به‌ترتیب از روابط (۲)، (۳) و (۴)محاسبه گردید (Golpira *et al.*, 2013):

$$H\,(\%) = \frac{p_c}{p_r+p_f+p_c} \times 100 \qquad (۲)$$

$$L_r(\%) = \frac{p_r}{p_r+p_f+p_c} \times 100 \qquad (۳)$$

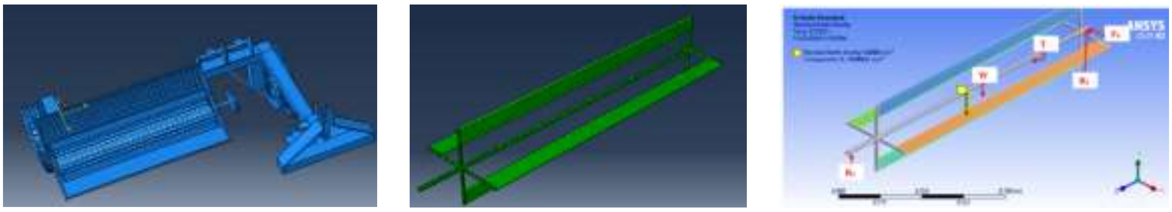
$$L_f(\%) = \frac{p_f}{p_r+p_f+p_c} \times 100 \qquad (۴)$$

که در آن H، درصد برداشت محصول، L_r درصد تلفات مربوط به غلاف‌های باقی‌مانده بر روی بوته (٪)، L_f درصد تلفات مربوط به غلاف‌های افتاده بر روی زمین (٪)، p_c تعداد غلاف‌های برداشت شده

توسط دماغه ماشین نخود، p_r تعداد غلاف‌های باقی‌مانده روی بوته، p_f تعداد غلاف‌های افتاده بر روی زمین می‌باشد. قبل از انجام آزمایش‌های برداشت در کارگاه ابتدا متغیرهای مستقل مانند سامانه با و بدون صفحه مشبک، ارتفاع و فاصله افقی چرخ‌فلک از شانه برش تنظیم شدند. برای تعیین دور محور تواندهی و دور محور چرخ‌فلک از یک دورسنج دیجیتال (P2795-PeackTech, Taiwan) با دقت ۰/۱ دور بر دقیقه و صحت ۵ درصد استفاده شد. در این بخش با تنظیم گاز تراکتور، دو پارامتر سرعت پیشروی و سرعت محور تواندهی که ارتباط مستقیم با سرعت محیطی چرخ‌فلک دارد تنظیم می‌شد. به‌منظور تعیین سرعت پیشروی تراکتور مسافت ۳۰ متر علامت‌گذاری شد. سپس در دنده‌های مختلف با تغییر دور موتور از طریق گاز دستی تراکتور سرعت پیشروی مورد نظر تنظیم شد.

مدل‌سازی (تحلیل استاتیکی و دینامیکی)

یکی از مواردی که بر میزان مصرف انرژی، قدرت مانورپذیری و میزان ریزش محصول در هنگام برداشت تأثیر می‌گذارد، وزن سامانه برداشت است. افزایش وزن دستگاه نه تنها باعث افزایش نیروی مالبندی (انرژی مصرفی) می‌گردد، بلکه باعث کاهش قابل محسوس عملکرد بردارنده و مصرف بیشتر سوخت می‌شود. در این تحقیق مدل‌سازی چرخ‌فلک با هدف تعیین تغییر شکل بیشینه پره‌ها و کاهش وزن انجام گرفت. تغییرشکل زیاد پره‌ها باعث آسیب به سامانه یا نخود برداشت شده می‌شود. میزان تغییرات کرنش و تنش تحت اثر سرعت دورانی چرخ‌فلک و سرعت پیشروی با توجه به تغییر در سه پارامتر بررسی شد: ۱- ابعاد پره یا ضخامت پره ۲- سطح مقطع اتصال پره به میله وسط ۳- سطح مقطع میله وسط. مدل‌سازی با در نظر گرفتن عوامل محیطی شامل سرعت پیشروی، سرعت دورانی و نیروهای واردشده از بوته‌ها انجام پذیرفت. به دلیل نیروهای مضاعفی که بر سامانه وارد می‌شود تمرکز بیشتر روی تحلیل دینامیکی سامانه بود. هرچند برای اطمینان، تحلیل استاتیکی نیز صورت پذیرفت. تحلیل استاتیکی چرخ‌فلک با استفاده از نرم‌افزار انسیس (Ansys-v19) و تحلیل دینامیکی از نرم‌افزار آباکوس (Abaqus-v18) انجام شد. در هر کدام از نرم‌افزارهای اشاره شده از روش اجزای محدود سه‌بعدی استفاده شد. برای پره‌ها مش هگزاهدرال به میانگین ۵ میلی‌متری و برای میله چرخ‌فلک مش هرمی میانگین ۴ میلی‌متر انتخاب شد که در شکل ۲ نشان داده شده است. شتاب گرانش در همه تحلیل‌ها $m.s^{-2}$ ۹/۸۱ در نظر گرفته شد. محل‌های اتصال با قیدهای ال-ام و با قید tie به هم درگیر و متصل شدند. خواص فیزیکی و مکانیکی مواد استفاده شده در چرخ‌فلک در جدول ۱ برای استفاده در تحلیل‌های نرم‌افزاری لیست شده است. هم‌چنین در شکل ۲ برآیند کل نیروهای حجمی (وزن) تمام اجزای چرخ‌فلک در شکل با W نشان داده شده است. این نیرو توسط دو نیروی عکس‌العمل R_1 و R_2 در یاتاقان‌های نگه‌دارنده محور تحمل می‌شوند. در شرایط کاری چرخ‌فلک، گشتاور ورودی T_o (برحسب نیوتون‌متر) از طریق پولی به محور چرخ‌فلک اعمال می‌گردد و هم‌چنین نیروی کشش F_b ناشی از کشش تسمه و عکس‌العمل کشش تسمه در یاتاقان R_x بر محور چرخ‌فلک وارد می‌شوند.



شکل ۲- مش‌بندی چرخ‌فلک و نیروهای واردشده به آن با در نظر گرفتن نیروهای درونی و خارجی
Fig. 2. Meshing of reel and the forces applied to it considering internal and external forces

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی میله و پره‌های چرخ‌فلک
Table 1- Physical and mechanical properties of rod and paddles of reel

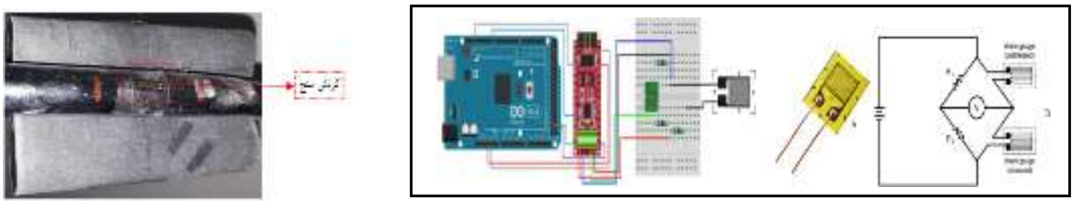
جنس مواد Material type	نسبت پواسون Poisson's ratio	چگالی ($kg.m^{-3}$) Density	مدول الاستیسیته (MPa) Elasticity modulus
فولاد Steel	0.3	7830	205
چوب Wood	0.27	1000	0.7

در این بخش از معیار ون میسز (von-Mises) برای تحلیل شکست در مجموعه استفاده شد. ویژگی‌های نرم‌افزار کمک می‌کند تا بتوان از یک طرف شرایط بحرانی را مورد بررسی قرار داد و از سوی دیگر آن را بهینه نمود. مدل طراحی شده تحت شرایط بحرانی (بیشترین تعداد بوته درگیر ۲۷۳/۵ نیوتن، بیشترین گشتاور پیچشی ۹۷۴/۴ کیلوگرم– سانتی‌متر، بالاترین سرعت دورانی ۲۹۴/۴ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۲/۵ کیلومتر بر ساعت) قرار گرفته و در نهایت بهترین مدل با حداقل هزینه و بالاترین راندمان عمل ارائه می‌شود. در تحلیل سامانه از تنش طراحی (حداکثر تنشی که می‌تواند یک جسم تحمل کند تا از تنش تسلیم عبور نکند) استفاده شد. برای فولاد St 37، مدول الاستیسیته ۲۰۵ گیگاپاسکال، تنش تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال در محاسبات لحاظ شد. در بهینه‌سازی وزنی معیار ضریب اطمینان ۳/۲ در نظر گرفته شد که معیار مناسبی برای طراحی است.

ضریب طراحی با استفاده از رابطه (۵) با تقسیم تنش طراحی σ_d بر تنش محاسباتی σ_c به‌دست آمد (Shigley, 2011):

$$SF = \frac{\sigma_d}{\sigma_c} \qquad (۵)$$

برای پی بردن به دقت مدل‌سازی صورت گرفته توسط نرم‌افزار بایستی درستی نتایج به‌دست آمده مورد ارزیابی قرار گیرد. به این منظور از یک بورد و چند کرنش‌سنج که در محل‌های مورد نظر روی چرخ‌فلک نصب می‌شدند، استفاده گردید. شماتیک کرنش‌سنج‌ها و طریقه نصب آن روی قطعه در شکل ۳ نشان داده شده است. میزان تنش وارد شده در قسمت‌های مختلف شامل محور وسط و میله‌های اتصال بودند. نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار با نتایج به‌دست آمده از آزمایش کرنش‌سنج مورد مقایسه قرار گرفته و دقت شبیه‌سازی حاصل شد.



شکل ۳– شماتیک مدار استفاده شده برای صحت‌سنجی و کرنش‌سنج قرار گرفته روی قطعه برای اندازه‌گیری میزان تنش

Fig. 3. The schematic of circuit and strain gages to measure the stress of the part

نتایج و بحث

در جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس اثرات پارامترهای مختلف چرخ‌فلک بر مقدار نخود برداشت شده، نشان داده شده است. میزان برداشت محصول با استفاده از سامانه بردارنده نخود در یک آزمایش فاکتوریل ۳×۳ با طرح کاملا تصادفی در ۳ تکرار بررسی شد. بررسی نتایج نشان داد که وجود صفحه مشبک در سامانه تاثیر معنی‌داری در سطح یک درصد در برداشت محصول داشت. همچنین تغییرات ارتفاع دماغه بر میزان برداشت محصول در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. اثر متغیر دیگر یعنی فاصله چرخ‌فلک از شانه برش به تنهایی معنی‌دار نبوده است. اثر متقابل دوگانه و سه‌گانه متغیرهای اشاره بر میزان برداشت محصول نیز معنی‌دار نبود. به عبارت دیگر با تغییرات هم‌زمان متغیرهای اشاره شده میزان برداشت محصول تغییر محسوسی نداشت. علاوه بر آن در جدول ۲ اثر وجود یا عدم وجود صفحه مشبک بر ریزش نخود در سطح یک درصد معنی‌دار می باشد. وجود صفحه مشبک حداقل به میزان ۴/۵ درصد باعث کاهش ریزش می‌گردد. ارتفاع بردارنده نیز در سطح ۵ درصد بر ریزش دستگاه بردارنده تاثیر می‌گذارد. اما در این حالت نیز فاصله چرخ‌فلک از کف دماغه بر میزان برداشت معنی‌دار نمی‌باشد. اثر متقابل متغیرهای صفحه مشبک و ارتفاع بردارنده بر میزان ریزش در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. اما اثرات دوگانه صفحه مشبک با فاصله چرخ‌فلک و ارتفاع بردارنده با فاصله و اثر سه‌گانه بر میزان ریزش محصول معنی‌دار نیست. نتایج تجزیه واریانس اثر متغیرها نشان داد که وجود صفحه مشبک بر میزان نخود باقی‌مانده بر روی بوته در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. اثر فاصله چرخ‌فلک از کف بردارنده نیز در سطح یک درصد معنی‌دار می‌باشد. به‌عبارت دیگر تغییر این فاصله تاثیر زیادی بر میزان بر محصول باقی‌مانده به دلیل کنده شدن غلاف از بوته دارد. اثر چندگانه بر محصول باقی‌مانده بر روی بوته نخود در هیچ‌کدام از سطوح یک و ۵ درصد معنی‌دار نیست.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثرات پارامترهای مختلف چرخ‌فلک بر مقدار نخود برداشت شده، باقی‌مانده روی بوته و ریزش یافته

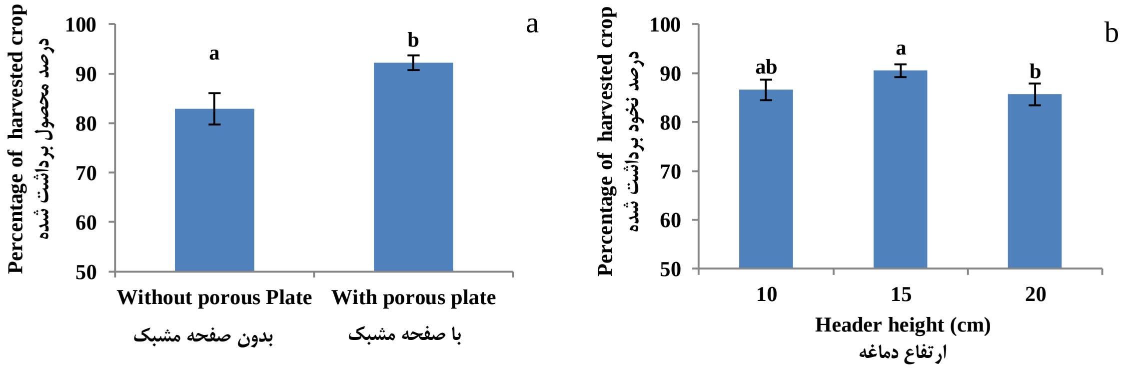
Table 2- The results of analysis variance of the effects of different parameters of the header on the amount of harvested chickpea, chickpea loss and residual chickpea on the plant

	منابع تغییرات **Source of variances**	درجه آزادی **DF**	مجموع مربعات **Sum of squares**	میانگین مربعات **Mean squares**	**F-value**
نخود برداشت شده Harvested Chickpea	صفحه مشبک Perforated plate	1	0.0417	0.0417	129.53**
	ارتفاع دماغه Header height	2	0.00601	0.00301	9.34*
	فاصله چرخ فلک Reel distance	2	0.0048	0.00024	0.75
	صفحه مشبک × ارتفاع دماغه Header height×Perforated plate	2	0.355	0.00177	5.51
	صفحه مشبک × فاصله چرخ فلک Reel distance×Perforated plate	2	0.0098	0.00049	1.52
	ارتفاع دماغه× فاصله چرخ فلک Reel distance×Header height	4	0.0015	0.00004	0.12
	صفحه مشبک × ارتفاع دماغه× فاصله افقی چرخ فلک Reel distance× Header height×Perforated plate	4	0.0053	0.0025	1.12
	Error خطا	27	0.0101	–	–
	Total مجموع	44	0.43421	–	–
مقدار ریزش نخود Chickpea Loss	صفحه مشبک Perforated plate	1	0.02452	0.02452	542.51**
	ارتفاع دماغه Header height	2	0.00098	0.00049	10.8*
	فاصله چرخ فلک Reel distance	2	0.0016	0.00008	1.75
	صفحه مشبک × ارتفاع دماغه Header height×Perforated plate	2	0.00093	0.00046	10.28*
	صفحه مشبک× فاصله چرخ فلک Reel distance×Perforated plate	2	0.00008	0.00004	0.9
	ارتفاع دماغه × فاصله چرخ فلک Reel distance×Header height	4	0.00064	0.00016	3.52
	صفحه مشبک× ارتفاع دماغه× فاصله چرخ فلک Perforated plate× Header height× Reel distance	4	0.00722	0.0007	0.152
	Error خطا	27	0.0016	-	–
	Total مجموع	44	0.03757	–	–
نخود مانده روی بوته Residual Chickpea on the Plant	صفحه مشبک Perforated plate	1	0.00169	0.00169	17.39*
	ارتفاع دماغه Header height	2	0.00075	0.00038	3.85
	فاصله چرخ فلک Reel distance	2	0.00502	0.00251	25.77**
	صفحه مشبک× ارتفاع دماغه Header height×Perforated plate	2	0.00056	0.00028	2.88
	صفحه مشبک× فاصله چرخ فلک Reel distance×Perforated plate	2	0.00049	0.00024	2.51
	ارتفاع دماغه × فاصله چرخ فلک Reel distance×Header height	4	0.00129	0.00032	3.32
	صفحه مشبک× ارتفاع دماغه× فاصله چرخ فلک Reel distance× Header height×Perforated plate	4	0.0013	0.002	1.952
	Error خطا	27	0.0012	-	–
	Total مجموع	44	0.0124	–	–

** بسیار معنی‌دار (در سطح ۱٪) **: Significant at level 1%، * معنی‌دار (در سطح ۵٪) Significant at level 5%

در شکل‌های ۴ تا ۶ مقایسه میانگین اثرات صفحه مشبک، ارتفاع دماغه و فاصله چرخ‌فلک از دماغه بر میزان برداشت، ریـزش و مقـدار نخود باقی‌مانده بر روی بوته نشان داده شده است که جداگانه در مورد هر شکل توضیحاتی ارائه می‌گردد.

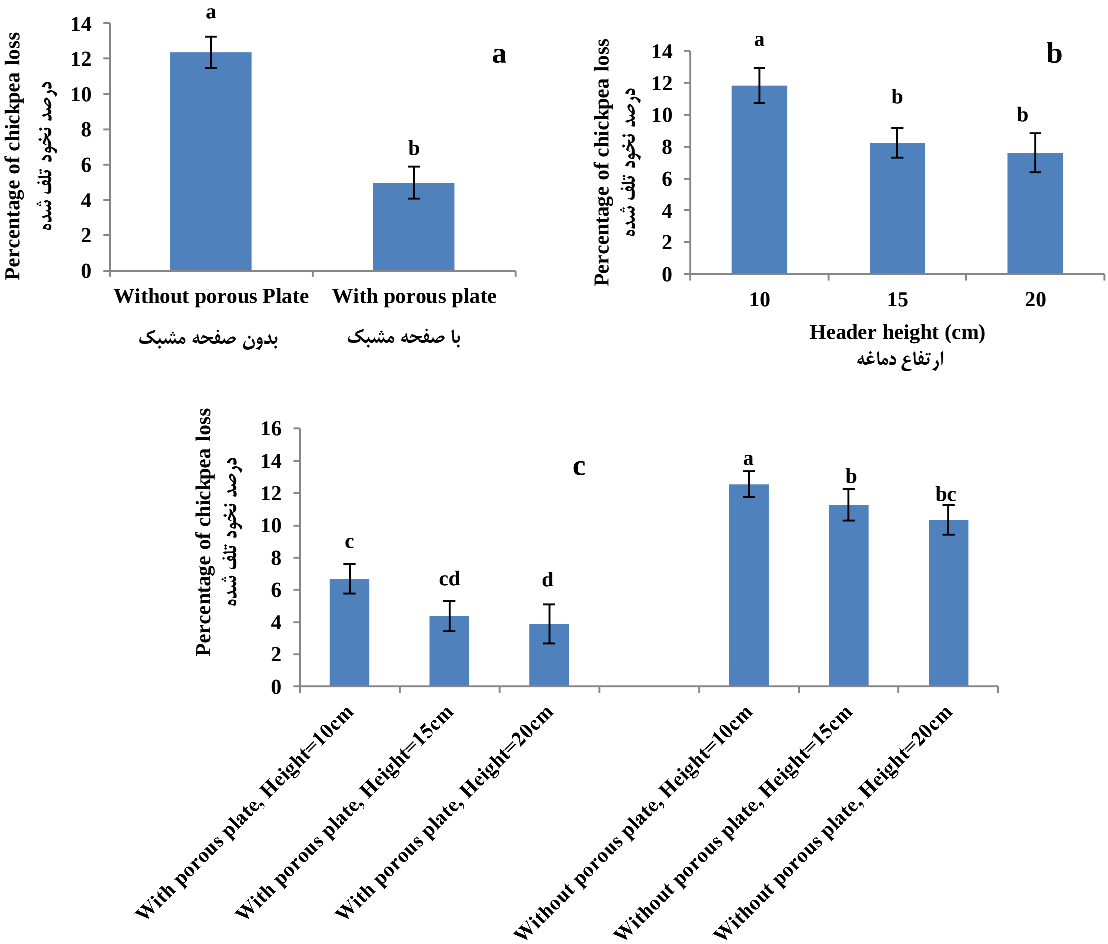
اثرات وجود و عدم وجود صفحه مشبک و ارتفاع دماغـه از سـطح زمین بر شاخص‌های برداشت در شاخص سینماتیک ۱/۵ نشان داد که میزان محصول برداشت شده در این حالت با صفحه مشبک بیشـتر از حالتی است که صفحه مشبک موجود نیست. همان طور که اشاره شد این اثر معنی‌دار و به عبارتی تاثیر زیادی دارد. در این حالت با جداپش غـلاف‌هـا از بوتـه مسـتقیما غـلاف بـه‌صـورت احتمـالی در یکـی از سوراخ‌های صفحه جای گرفتـه و در قسـمت پشـت صـفحه مشـبک جمع‌آوری شده و از آنجا خارج می‌شود. علاوه بر آن حتی بـا جـداپش ساقه‌ها به دلیل سایش مناسبی که بین صفحه و پره چرخ‌فلک وجـود دارد غلاف‌ها به‌خوبی جدا شده و از شبکه توری مانند عبور مـی‌کننـد. در هر دو حالت امکان بازگشت غلاف یا ساقه به مزرعه تا حد زیـادی کاهش می‌یابد. این میزان برداشت بـرای حالـت بـا صـفحه مشـبک به‌صورت میانگین ۹۲/۲۵ درصد بود. از طرف دیگر با افـزایش ارتفـاع دماغه بردارنده از ۱۰ سانتی‌متـر بـه ۱۵ سـانتی‌متـر میـزان برداشـت افزایشی شده و سپس در ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر کـاهش مـی‌یابـد. ایـن روند افزایشی و کاهشی شاید به این دلیل باشد کـه بـا در ارتفـاع ۱۰ سانتی‌متر حجم بیشتری از ساقه وارد دماغـه شـده و امکـان جـداپش به‌دلیل انباشت زیاد بوته نخود کـاهش یافتـه و احتمـال بازگشـت یـا پرتاب بوته به بیرون از دماغه افزایش می‌یابد. با افزایش ارتفـاع از ۱۵ سانتی‌متر به ۲۰ سانتی‌متر به دلیل پاکوتاه بودن و دیمی بودن واریتـه، غلاف‌ها بدون برداشته شدن در مزرعه باقی‌مانده و از دسـترس خـارج می‌گردد. در تحقیقات مشابه نیز موارد اشاره شده گزارش شـده اسـت (Golpira *et al.*, 2013; Zareei & Abdollahpour, 2013).



شکل ٤- مقایسه میانگین a) اثرات وجود یا عدم وجود صفحه مشبک و b) ارتفاع دماغه بر درصد محصول برداشت شده

Fig. 4. Comparison of the mean effects of a) the perforated plate and b) header height on the percentage of harvested crop

در شکل ۵ مقایسه میانگین اثرات صفحه مشبک و ارتفاع دماغـه بر پارامترهای برداشت در شـاخص سـینماتیک ۱/۵ نشـان داده شـده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، مقدار نخود ریزش شده و صفحه مشبک ارتباط مستقیم با هم دارند. به طوری که در تیمارهایی که صفحه مشبک در سامانه وجود ندارد، مقدار ریزش محصول بیشینه است. بیشترین مقدار آن در حالت بدون صفحه مشـبک در ارتفـاع ۱۰ سانتی‌متر اتفاق می‌افتد (۱۲/۵۸ درصد). در حالت بدون شبکه با ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر چون ساقه کمتری نسبت به ارتفـاع ۱۰سـانتی‌متـر وارد سامانه می‌شود، بنابراین میزان ریزش کاهش می‌یابد. میزان تغییـرات درصد ریزش بین ارتفاع ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر معنی‌دار نیست. در مطالعه دیگر، نتیجه مشابه گزارش برای حالـت دیگـری از ماشـین برداشـت نخود ارائه شده است که بـا افـزایش ارتفـاع برداشـت میـزان ریـزش افزایش می‌یابد (Golpira *et al.*, 2013).

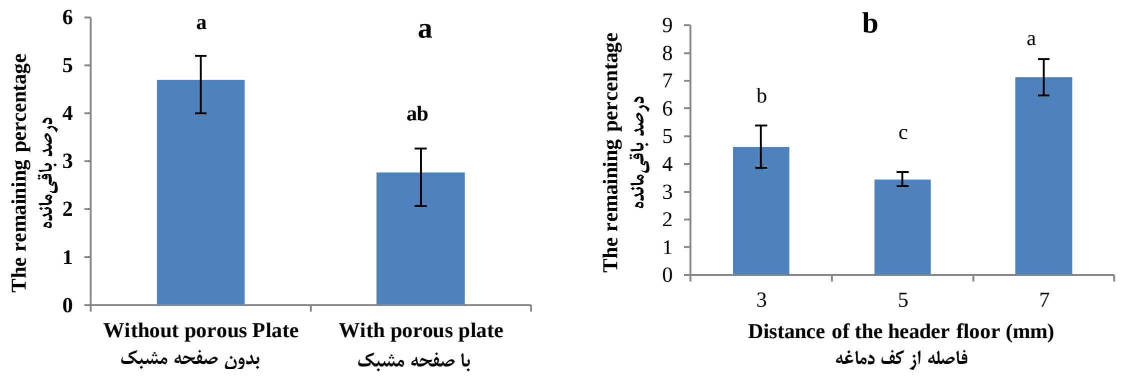


شکل ۵- مقایسه میانگین اثرات a) وجود یا عدم وجود صفحه مشبک و b) ارتفاع دماغه و c) اثر متقابل آن‌ها بر متغیرهای بر درصد ریزش محصول

Fig. 5. Comparison of the mean effects of a) perforated plate, b) header height and c) the interactions on the percentage of chickpea loss

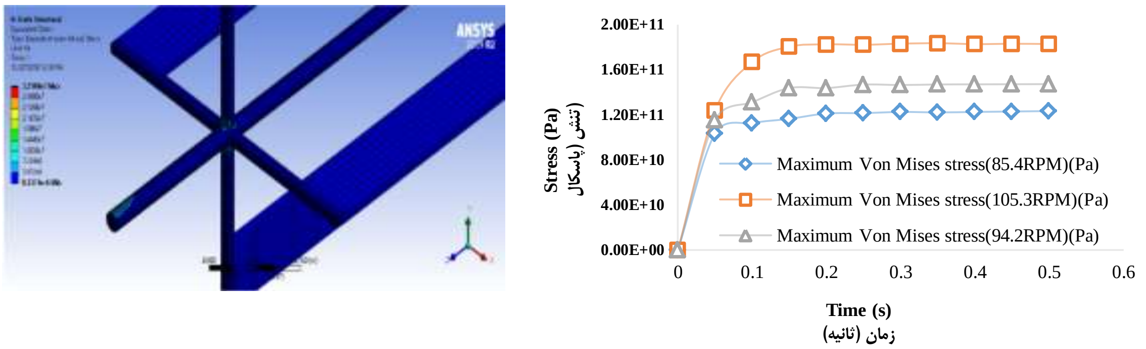
در شکل ۶ (الف و ب) مقایسه میانگین اثرات صفحه مشبک و فاصله چرخ‌فلک از کف دماغه بردارنده در شاخص سینماتیک ۱/۵ نشان داده شده است که اثر هر کدام از موارد اشاره شده بر محصول باقی‌مانده بر روی بوته به‌ترتیب در سطح ۵ و یک درصد معنی‌دار است. با قرار دادن صفحه مشبک در سامانه، به دلیل وجود سایش در هنگام برداشت، به‌خصوص برای بوته‌های با ارتفاع بیشتر از ۱۵ سانتی‌متر، ساقه بر روی صفحه مشبک خوابانده شده و با برخورد چرخ‌فلک با ساقه قسمت اعظمی از غلاف‌ها کنده می شوند. همچنین میزان محصول باقی‌مانده بر روی بوته با افزایش فاصله از کف دماغه برداشت، افزایش می‌یابد. اما اختلاف بین دو فاصله ۳ و ۵ میلی‌متر معنی‌دار نمی‌باشد. بیشترین میزان محصول باقی‌مانده در فاصله ۷ میلی‌متر، اتفاق می‌افتد و مقدار آن ۷/۱۲ درصد بود. در این فاصله غلاف به‌راحتی از زیر چرخ‌فلک رها شده و اگر چنانچه شکستگی رخ ندهد بر روی بوته باقی می‌ماند. از طرف دیگر با فاصله ۳ میلی‌متر احتمال شکستگی محصول نخود دور از انتظار نخواهد بود.

بنابراین با توجه به مقادیر برداشت، ریزش و باقی‌مانده محصول روی بوته می‌توان چنین اظهار داشت که بهترین ترکیب برای برداشت با این سامانه، استفاده از صفحه مشبک در ارتفاع برداشت ۱۵ سانتی‌متر و فاصله بین چرخ‌فلک و دماغه به اندازه ۵ میلی‌متر اتفاق می‌افتد. در این حالت میزان برداشت، ریزش و باقی‌مانده روی غلاف ۹۴/۶۱ درصد، ۳/۶۱ درصد و ۱/۷۸ درصد می‌باشد.



شکل ٦– مقایسه میانگین اثرات a) صفحه مشبک و b) فاصله از کف دماغه بر درصد محصول باقی‌مانده بر روی بوته
Fig. 6. Comparison of the mean effects of the a) perforated plate and b) distance of the header floor on the percentage of chickpea remaining on the plant

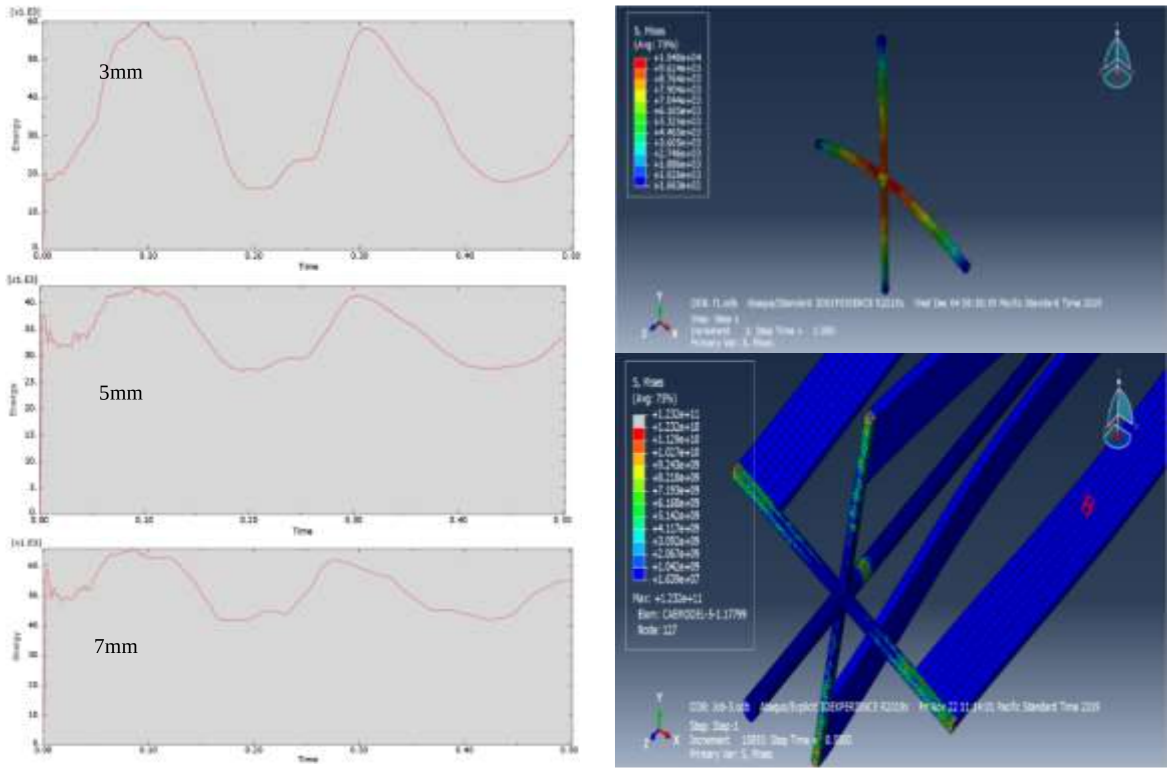
در این قسمت نتایج حاصل از مدل‌سازی و تحلیل تنش در چرخ‌فلک ماشین‌برداشت نخود موردبحث قرار می‌گیرد. ابتدا نتایج تحلیل استاتیکی و سپس نتایج تحلیل دینامیکی ارائه می‌گردد. در شکل ۷ نتایج حاصل از خروجی نرم‌افزار Ansys برای تحلیل استاتیکی چرخ‌فلک نشان داده شده است. مقدار کمینه تنش ۳/۳۱ و بیشینه تنش ۶/۵۰ مگاپاسکال بود که مقدار بیشینه تنش در مقایسه با تنش تسلیم دماغه خیلی کوچک است. لذا ضریب اطمینان دماغه تحت بارگذاری استاتیکی بسیار بالا بوده و دماغه از استحکام کافی برخوردار است. در منابع دیگر نیز برای حالت استاتیکی ماشین‌ها، مقادیر ضریب اطمینان بیشتر از ۲ به‌عنوان نقطه امن در نظر گرفته شده است (Srivastava *et al.*, 2006). مقدار بیشینه تنش ایجاد شده در چرخ‌فلک در محل اتصال به دماغه به دلیل وزن آن اتفاق می‌افتد. همچنین در شکل ۷ نمودارهای همگرایی در مقدار تنش بیشینه ایجادشده در چرخ‌فلک به ازای مقادیر مختلف شاخص سینماتیک نشان داده شده است. پاسخ‌های تنش بیشینه در بازه زمانی ۰/۵ ثانیه همگرا شدند.



شکل ۷– همگرایی در تنش ماکزیمم بر اساس معیار ون میسز در مقادیر مختلف سرعت دورانی چرخ‌فلک و کانتورهای تنش حاصل از تحلیل استاتیکی چرخ‌فلک
Fig. 7. Convergence in maximum stress based on Von Misses criterion in the rotational speed of the reel and stress contours obtained from the static analysis the reel

در شکل ۸ تغییرات تنش بر پایه معیار ون میسز و کرنش در چرخ‌فلک و اجزای آن با تغییر سرعت دورانی اعمال‌شده بر آن نشان داده شده است. کمترین میزان کرنش و تنش با رنگ آبی و بیشترین آن با رنگ قرمز مشخص شده است. بیشینه تنش ون میسز ایجادشده در چرخ‌فلک با افزایش شاخص سینماتیک افزایش یافت. به طوری که مقدار بیشینه در فاصله عمودی ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر به‌ترتیب برابر با ۳۲/۲، ۴۰/۱ و ۵۲/۷ مگاپاسکال مشاهده شد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با کاهش فاصله عمودی، نیروی اعمالی به پره‌ها افزایش یافته، میزان تنش ایجاد شده در چرخ‌فلک نیز افزایش می‌یابد. بنابراین فرآیند بهینه‌سازی تا حدی انجام شد که کم‌ترین میزان تنش

و کرنش در آن ایجاد گردد. بیشترین میزان تنش ون میسز مربوط به قسمت اتصال پره‌ها و قاب نگه‌دارنده پره‌ها بود؛ به عبارت دیگر قاب نگه‌دارنده به دلیل اعمال نیرو از طرف پره‌ها همواره در معرض بیشینه تنش برشی قرار دارد. تنش برشی در محل تماس پره‌های چرخ‌فلک ۲۲/۷ مگاپاسکال می‌باشد. کرنش ایجادشده به ازای مقادیر بیشینه تنش برشی در محل وسط پره‌ها و مقدار آن برابر با ۰/۰۳۰۴ مشاهده شد. آنالیز دینامیکی پره‌های چرخ‌فلک نشان داد که بیشترین تغییر طول مربوط به لبه‌های پره‌ی چرخ‌فلک است که مقدار آن در انتهای خارجی بیشتر است و بیشترین جابه‌جایی یا کش آمدگی را دارد. این امر به دلیل نیروی گریز از مرکز و نیروی وارد از سمت بوته‌ها به پره‌های چرخ‌فلک بود. با توجه به این‌که بیشینه تنش برشی در محل قاب چرخ‌فلک مشاهده شد لذا به‌طور جداگانه قاب چرخ‌فلک تحلیل شد. بیشینه تنش برشی در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است بیشینه تنشی که بر قاب وارد می‌شود ۱۰/۴۸ مگا پاسکال است که مقدار آن نسبت به تنش تسلیم قاب خیلی کمتر است. با توجه به نتایج مدل‌سازی و آنالیز دینامیکی چرخ‌فلک با تغییر سرعت دورانی و حرکت، قطر میله وسط از ۱۸ به ۲۵ میلی‌متر تغییر یافت اما ابعاد پره تغییر محسوسی نکرد. علاوه بر آن ضخامت پره‌ها از ۱۸ به ۱۳ میلی‌متر و ابعاد میله‌های اتصال‌دهنده پره‌ها به شفت میانی از سطح مقطع ۲۰ در ۲۰ میلی‌متر مربع به ۱۲ در ۱۴ میلی‌متر مربع و به‌صورت تصحیح‌شده ۱۰ در ۲۰ میلی‌متر مربع تغییر یافت.

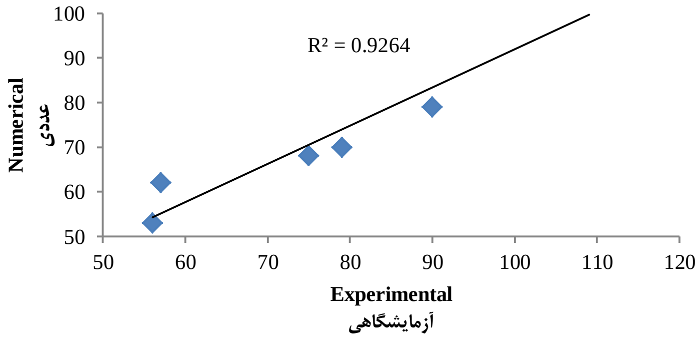


شکل ۸– توزیع تنش برشی و خمشی در میله‌ها و پره‌های چرخ‌فلک و تغییرات انرژی جنبشی در چرخ‌فلک در ۱/۵ دور گردش چرخ‌فلک در شاخص سینماتیک ۱/۵ برای فاصله عمودی ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر

Fig. 8. Distribution of shear and bending stress in the rods and blades of the reel and variations of kinetic energy in the reel in 1.5 rounds of rotation via kinematic index of 1.5 for vertical distance of 3, 5 and 7 mm

نتیجه حاصل از اعتبارسنجی مدل سه‌بعدی (با استفاده از کرنش‌سنج‌ها) در شکل ۹ نمایش داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که مدل‌سازی انجام شده با نرم‌افزار آباکوس به خوبی (R^2>0.9264) توانسته است میزان تنش در قسمت‌های مختلف چرخ‌فلک را پیش‌بینی کند؛ بنابراین نتایج به‌دست آمده برای تنش و بهینه‌سازی با قطعیت بالای ۹۲ درصد اعتبار دارند که با مقادیر اشاره شده در آنالیز یک قطعه که با نرم‌افزار صورت گرفته مطابقت دارد (Li, Chen, Zhang, & Tong, 2013). لازم به ذکر است خطای به‌وجود آمده در نرم‌افزار آباکوس شاید به دلیل ایده‌آل در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مصالح استفاده شده در سامانه باشد. ویژگی‌های محیطی نیز از دیگر عواملی است که می‌تواند باعث به‌وجود آمدن خطا در نتایج آزمایشگاهی باشد. علاوه بر آن با ارزیابی-

های انجام شده و با توجه به میزان کاهش وزن سامانه و مقاومت غلتشی، توان مورد نیاز برای کشش سامانه به اندازه حداقل ۲/۷۶ اسب بخار کاسته می‌شود. انتظار می‌رود میزان مانورپذیری نیز بهبود یابد. تاثیر عامل اشاره شده بایستی به‌صورت عملی نیز در مزرعه مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۹– میزان همبستگی داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های عددی حاصل از نرم‌افزار آباکوس

Fig. 9. The correlation between experimental and numerical data obtained from Abaqus software

نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای عملکرد مناسب و افزایش کارایی سامانه، تغییراتی روی ماشین برداشت نخود شامل ساختار و وزن سامانه انجام شد. نتایج آماری نشان داد تأثیر پارامترهای مستقل صفحه مشبک، ارتفاع برداشت بر میزان درصد برداشت محصول به‌ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار است. با توجه به نتایج آنالیز واریانس و نمودارهای مقایسه میانگین‌ها بیشترین مقدار برداشت محصول در حالت با صفحه مشبک و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر اتفاق می‌افتد. همچنین تاثیر صفحه مشبک و ارتفاع برداشت به‌ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار شدند. اثر متقابل صفحه مشبک و ارتفاع بردارنده نیز در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. با افزودن صفحه مشبک به دلیل سایش مناسب بین چرخ‌فلک و صفحه، میزان ریزش در مزرعه کاهش یافت. در مورد محصول باقی‌مانده بر روی بوته نیز صفحه مشبک و فاصله بین چرخ‌فلک و کف دماغه به‌ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار بودند. با کم شدن فاصله گیرایی بین محصول و چرخ‌فلک افزایش یافته و احتمال باقی‌مانده محصول بر روی بوته به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. بهینه‌ترین حالت برای برداشت نخود با سامانه با صفحه مشبک، در ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر و فاصله ۵ میلی‌متر اتفاق می‌افتد. با توجه به نتایج مدل‌سازی دینامیکی چرخ‌فلک، قطر میله وسط از ۱۸ به ۲۵ میلی‌متر تغییر یافت. علاوه بر آن، ضخامت پره‌ها از ۱۸ به ۱۳ میلی‌متر و ابعاد سطح مقطع میله‌های اتصال‌دهنده پره‌ها به شفت میانی از ۲۰ در ۲۰ میلی‌متر مربع به ۱۲ در ۱۴ میلی‌متر مربع و به‌صورت تصحیح‌شده ۱۰ در ۲۰ میلی‌متر مربع تغییر پیدا نمود. پیشنهاد می‌شود برای بهبود کارایی سامانه تغییری در اندازه و تعداد سوراخ‌های صفحه و زاویه قرارگیری آن صورت گیرد.

References

1. Anjum, N. A. (2016). Book Review: *Legumes under environmental stress: yield, Improvement and adaptations*. Frontiers in Plant Science. Wiley and Sons.
2. Baruah, D. C., & Panesar, B. S. (2005). Energy requirement model for a combine harvester, part I: Development of component models. *Biosystems Engineering*, *90*(1), 9-25. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.08.017
3. Behroozi-Lar, M., & Huang, B. K. (2002). Design and development of chickpea combine. *Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America*, *33*(1): 35-38.
4. Dehghan-Hesar, H., & Kalantari, D. (2019). Design and Evaluation of Two New Biomimetic Blades for Reducing the Shear Energy Required for Cutting Herbal Plants. *Journal of Agricultural Machinery*, *9*(2), 265-278. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.v9i2.69843
5. Ebrahimi-Nik, M. A., Khademolhosseini, N., Abbaspour-Fard, M. H., Mahdini, A., & Alami-Saied, K. (2009). Optimum utilisation of low-capacity combine harvesters in high-yielding wheat farms using multi-criteria decision making. *Biosystems Engineering*, *103*(3), 382-388. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.04.009
6. Golpira, H., Tavakoli, T., Khoshtaghaza, M. H., & Minaei, S. (2009). Mechanical properties of chickpea to design of harvesting machines. *Agricultural Science*, *19* (2), 23-31.
7. Golpira, H., Tavakoli, T., & Baerdemaeker, J. D. (2013). Design and development of a chickpea stripper

harvester. *Spanish Journal of Agricultural Research*, *11*(4), 929-934. http://doi.org/10.5424/sjar/2013114-3393
8. Golpira, H. (2015). Redesign and evaluation of chickpea harvester. *Journal of Biosystems Engineering*, *40*(2), 102-109.
9. Golpira, H., & Golpira, H. (2017). Soft simulator for redesigning of a chickpea harvester header. *Computers and Electronics in Agriculture*, *135*: 252-259. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.018
10. Griffin, G. A. (1973). *Fundamentals of machine operation: combine harvesting*. John Deere Service Publications.
11. Guler, M., Sait-Adak, M., & Ulkan, H. (2001). Determining relationships among yield and some yield components using path coefficient analysis in chickpea. *European Journal of Agronomy*, *14*(2), 161-166. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00086-1
12. Hanna, H. M., & Quick, G. R. (2007). *Grain harvesting machinery design*. Handbook of farm, dairy and food machinery (Kutz M, edn). William Andrew Inc, Delmar, NY: 93-111.
13. Hirai, Y., Inoue, E., & Mori, K. (2004). Application of a quasi-static stalk bending analysis to the dynamic response of rice and wheat stalks gathered by a combine harvester reel. *Biosystems Engineering*, *88*(3), 281-294. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.04.010
14. Jalali, A., & Abdi, R. (2014). The effect of ground speed, reel rotational speed and reel height in harvester losses. *Journal of Agriculture and Sustainability*, *5*(2), 221-231.
15. Konak, M., Carman, K., & Aydin, C. (2002). Physical properties of chickpea seeds. *Biosystems Engineering*, *82*(1), 73–78. https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0053
16. Li, M., Chen, D., Zhang, S., & Tong, J. (2013). Biomimeitc design of a stubble-cutting disc using Finite Element Analysis. *Journal of Bionic Engineering*, *10*(1): 118-127. https://doi.org/10.1016/S1672-6529(13)60206-1
17. Mahmoudi, K. (2016). *Design, development and evaluation of a chickpea stripper header*. Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Snanadaj, Iran. (in Persian).
18. Mansori-Rad, D. (2006). *Tractors and agricultural machinery* (Volume II). Bu-Ali Sina University Press.
19. Mardani, K. (2016). *Design, manufacturing and evaluation of a chickpea harvesting machine*. Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. (in Persian).
20. Miller, M. D., Wright, M. E., Mailander, M. P., & Beard, J. (1990). A two-link harvester reel. *Applied Engineering in Agriculture*, *6*(2), 131-137.
21. Modares Motlagh, A., Rostampour, V., & Mardani, K. (2018). Design, fabrication and evaluation of a short-legged chickpea harvest machine. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, *49*, 83-94. https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.236196.664962
22. Razavi, S. M. A., Zaerzadeh, E., Khafaji, N., & Pahlevani, M. (2010). Some physical properties of seeds and splits of Desi chickpea (Kaka var). *Iran Journal Pulses Research*, *1*(1): 77-83. https://doi.org/10.22067/ijpr.v1i1.6357
23. Samineni, S., Siddique, K. H. M., Gaur, P. M., & Colmer, T. D. (2011). Salt sensitivity of the vegetative and reproductive stages in chickpea (*Cicer arietinum* L.): Podding is a particularly sensitive stage. *Environmental and Experimental Botany*, *71*(2), 260-268. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.12.014
24. Shahbazi, F. (2011). Impact damage to chickpea seeds as affected moisture content and impact velocity. *Applied Engineering in Agriculture*, *27*(5), 771-775. http://doi.org/10.13031/2013.39557
25. Shigley, J. E. (2011). *Shigley's mechanical engineering design*. McGraw-Hill.
26. Sidahmed, M., & Jaber, N. (2004). The design and testing of a cutter and feeder mechanism for the mechanical harvesting of lentils. *Biosystems Engineering*, *88*, 295-304. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.04.002
27. Singh, U., Gaur, P., Singh, G., & Chaturvedi, S. J. F. M. F. P. (2018). *Mechanical Harvesting of Chickpea*: Agronomic Interventions. 196.
28. Srivastava, A. K., Goering, C. E., Rohrbach, R. P., & Buckmaster, D. R. (2006). Engineering principles of agricultural machines. *Engineering Principles of Agricultural Machinery*, *3*, 325-402. https://doi.org/10.13031/epam.2013
29. Tieppo, R. C., Romanelli, T. L., Milan, M., Sorensen, C. A. G., & Bochtis, D. (2019). Modeling cost and energy demand in agricultural machinery fleets for soybean and maize cultivated using a no-tillage system. *Computers and Electronics in Agriculture*, *156*, 282-292. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.032
30. Zandiyeh, S. 2016. *Design, development and evaluation of an automatic system to control the reel speed of the grain combine harvester*. M.Sc. Thesis. Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Snanadaj, Iran. (in Persian).
31. Zareei, S., & Abdollahpour, Sh. (2016). Modeling the optimal factors affecting combine harvester header losses. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, *18*(2), 60-65.
32. Zobeiri, M., Rostampour, V., Rezvanivand Fanaei, A., & Nikbakht, A. M. (2020). Experimental and numerical investigation of deviation blade effect on sedimentation chamber performance in chickpea harvesting machine. *Iranian Biosystems Engineering*, *51*, 329-339. https://doi.org/10.22059/ijbse.2020.276317.665166